

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора Ерёмин Александра Викторовича на диссертацию Кадочникова Ильи Николаевича «**Исследование термически неравновесных физико-химических процессов в азотной и воздушной плазме с использованием детальных уровневых и модовых кинетических моделей**», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Работа посвящена разработке и применению численных моделей для описания физико-химических процессов в течениях азотной и воздушной плазмы при нарушении термодинамического равновесия. Автором построены новые модели для азотной и воздушной плазмы как на базе уровневого, так и на базе модового приближений. С использованием развитых моделей изучены процессы в неравновесном газе за фронтом сильной ударной волны и в при сверхзвуковом расширении потока. На основе проведённых численных экспериментов сформулированы практические рекомендации по выбору приближения для моделирования механики неравновесного газа и плазмы.

### Актуальность работы

Для решения широкого круга задач физической газовой динамики и гиперзвуковой аэродинамики необходимы модели физико-химической кинетики, позволяющие учитывать многообразие процессов, протекающих при нарушении термодинамического равновесия между поступательными, колебательными и электронными степенями свободы молекул. Одним из способов описания физико-химических процессов в термически неравновесном газе является решение системы уравнений для заселённостей отдельных колебательных и электронных уровней молекул (уровневые модели). Разработка таких моделей представляет значительный научный интерес, поскольку позволяет получить детальное описание кинетики элементарных процессов, однако в связи с высокой сложностью применение уровневых моделей существенно ограничено. Для практики наиболее востребованы более простые модовые модели, в которых колебательное возбуждение молекулярной моды описывается одним параметром – колебательной температурой, что при сохранении простоты модели, тем не менее, даёт возможность учитывать влияние термической неравновесности на скорости химических реакций. В данной работе автором развиваются оба подхода. Новые детальные уровневые модели для азотной и воздушной плазмы, расширяющие круг учитываемых в подобных моделях процессов, важны для проведения



численных экспериментов и углубления представлений о физике неравновесного газа. А разработка и тестирование модовых моделей, обладающих повышенной точностью и известными границами применимости, является актуальной прикладной задачей.

### **Краткий анализ содержания работы**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 165 наименований и одного приложения.

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируется цель, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, причисляются основные результаты и положения, выносимые на защиту, приводится информация об апробации работы, о личном вкладе автора и о структуре и объеме диссертации.

В **первой главе** кратко рассматриваются основные этапы в истории изучения физики неравновесного газа, перечисляются задачи, для решения которых важен учёт колебательной неравновесности, приводятся ссылки на работы по соответствующим темам. В отдельных разделах главы представлены обзоры работ, посвящённых численному моделированию механики неравновесного газа с использованием уровневых и модовых моделей, сделаны выводы о современном состоянии данной области и нерешённых задачах.

**Вторая глава** посвящена разработке детальной уровневой модели для азотной плазмы, учитывающей процессы V-T релаксации, V-V и V-V' обмена, E-T релаксации, E-E обмена, возбуждения колебательных и электронных степеней свободы электронным ударом, диссоциацию и плазмохимические реакции. При этом, в модели автором впервые учитывается неравновесное возбуждение колебательных уровней для молекул азота как в основном, так и в четырёх электронно-возбуждённых состояниях. Показано, что построенная модель позволяет с хорошей точностью описать результаты экспериментов по измерению времён колебательно-поступательной релаксации, плотности и заселённости возбуждённых электронных состояний в релаксационной зоне за ударной волной в азоте.

В отдельном разделе данной главы с использованием уровневой модели рассматриваются физико-химические процессы, протекающие в расширяющемся потоке смеси  $N_2$ -IF-He. Рассматривается перспективность данной атомно-молекулярной системы для создания газодинамического лазера на электронно-колебательных переходах молекул IF.

**Третья глава** посвящена построению уровневой модели для воздушной плазмы, в которой неравновесное колебательное возбуждение рассматривается для молекул  $N_2$ ,  $O_2$  и NO в основном и возбуждённых электронных состояниях, при этом в модели учитывается более трёхсот химических и плазмохимических реакций. Показано, что модель хорошо



описывает экспериментальные данные по измерению интенсивности излучения полос  $\text{NO}(\gamma)$  и  $\text{N}_2^+(1-)$  за фронтом сильной ударной волны. Проведён анализ элементарных физико-химических процессов в воздушной плазме, образующейся в релаксационной зоне за ударной волной. Показано, что заселённости колебательных уровней молекул  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{NO}$  в различных электронных состояниях близки к распределениям Больцмана, вплоть до чрезвычайно высоких скоростей ударной волны ( $< 8$  км/с). На основании полученных результатов сделан вывод о целесообразности использования модового приближения при условии специального выбора модели для расчёта факторов неравновесности.

Построению таких модовых моделей (названных в работе модифицированными) для азотной и воздушной плазмы посвящена **четвёртая глава** данной работы. В модифицированных модовых моделях скорости физико-химических процессов предлагается определять подобно уровневому приближению, а именно суммированием скоростей элементарных физико-химических процессов в предположении больцмановского распределения молекул по колебательным уровням. Показано, что результаты модифицированных модовых моделей для азотной и воздушной плазмы при описании кинетики физико-химических процессов за фронтом сильной ударной волны и в расширяющемся потоке близки к результатам уровневых моделей, построенных в главах 2 и 3.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

В **приложении** в форме таблиц приводится полный перечень учитываемых в моделях для азотной и воздушной плазмы физико-химических процессов, а также используемых констант скорости данных процессов со ссылками на источники.

#### **Основные результаты диссертационной работы, полученные лично соискателем и обладающие новизной:**

- 1) Построены детальные уровневые модели для азотной и воздушной плазмы, учитывающие сложный комплекс протекающих в условиях термически неравновесности физико-химических процессов с участием молекул  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{NO}$  в различных электронно-колебательных состояниях.
- 2) С использованием развитых моделей проведены расчёты параметров азотной и воздушной плазмы за фронтом сильной ударной волны и проанализирована кинетика неравновесных физико-химических процессов. В частности, изучены особенности формирующихся в релаксационной зоне распределений электронно-возбуждённых молекул по колебательным уровням и отмечена роль



плазмохимических процессов в изменении состава воздуха за фронтом сильной ударной волны.

- 3) Построена уровневая модель для смеси  $N_2$ -IF-He, с использованием которой исследован механизм образования электронно-возбуждённых молекул IF при их подмешивании к разогретому азоту, и показана возможность создания инверсной населённости на электронно-колебательных уровнях молекул IF в расширяющемся потоке смеси  $N_2$ -IF-He.
- 4) Проанализированы причины существенных расхождений в результатах уровневых и модовых моделей, возникающих при описании параметров неравновесного газа за фронтом сильно ударной волны; на основании данного анализа предложен метод построения модифицированных модовых моделей, в которых скорости физико-химических процессов определяются суммированием поуровневых констант.
- 5) Построены модифицированные модовые модели для азотной и воздушной плазмы. Тестирование данных моделей показало, что они позволяют описывать параметры азотной и воздушной плазмы за фронтом сильной ударной волны и при сверхзвуковом расширении потока с точностью, близкой к точности уровневых моделей.

#### **Обоснованность и достоверность научных положений, выносимых на защиту**

Развиваемые в работе подходы к описанию неравновесных процессов в химически реагирующем газе являются общепринятыми, модели физико-химической кинетики используются корректно, аккуратно приведены ссылки на использованные константы скорости учитываемых процессов, проведено сравнение результатов моделирования и доступных экспериментальных данных, выводы не противоречат результатам работ других авторов, материалы работы прошли апробацию на профильных семинарах и докладывались на российских и международных конференциях. Всё это свидетельствует о высокой степени обоснованности и достоверности результатов, выводов и рекомендаций, полученных в диссертации.

#### **Замечания по диссертации:**

- 1) В диссертационной работе не приводится информации о использованных автором численных методах.
- 2) Известно, что использованная в 2-й главе модель Кузнецова даёт заведомо заниженные значения скоростей химических реакций за ударной волной. Поэтому при сравнительном анализе точности уровневой и модовой моделей



было бы правильнее использовать для расчёта факторов неравновесности более точные и распространённые модели, например, CVCV модель или модель Парка.

- 3) Из приведённого в приложении списка учитываемых химических реакций и констант скорости видно, что для многих плазмохимических реакций значения констант скорости носят, скорее, оценочный характер. Поэтому было бы полезно провести анализ чувствительности результатов моделирования к константам скорости данных процессов.
- 4) Автор последовательно сравнивает возможности развитых им модифицированных модовых моделей, с возможностями различных модовых моделей, известных в литературе. Однако, было бы интересно также сопоставить получаемые результаты с расчетами по так называемым лестничным моделям, особенно хорошо зарекомендовавшим себя для описания диссоциации многоатомных молекул.

Указанные замечания имеют рекомендательный характер и не снижают научной ценности работы.

### **Заключение**

Представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой, посвящённой актуальной теме и выполненной на высоком уровне. Полученные в работе результаты обладают новизной, представляют как научный, так и практический интерес, соответствуют пунктам 4 и 8 паспорта специальности 01.02.05 - "Механика жидкости, газа и плазмы". Выносимые на защиту положения прошли достаточную апробацию и были опубликованы в 4-х статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК. Автореферат правильно и полно отражает основные результаты диссертации.

Считаю, что диссертация «Исследование термически неравновесных физико-химических процессов в азотной и воздушной плазме с использованием детальных уровневых и модовых кинетических моделей» полностью соответствует критериям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждения ученых степеней» (Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), «О внесении изменений в Положение о присуждения ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Кадочников Илья Николаевич, несомненно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».



Зав. лаб. Неравновесных процессов ФГБУН ОИВТ РАН  
Д. ф.-м. н., проф.  
e-mail: [eremin@ihed.ras.ru](mailto:eremin@ihed.ras.ru)  
Тел: +74954832314

Еремин А. В.

Подпись Еремина Александра Викторовича заверяю:  
Ученый секретарь ФГБУН ОИВТ РАН  
Д.ф.-м.н.  
e-mail: [amirovravil@yandex.ru](mailto:amirovravil@yandex.ru)  
Тел: +74954859009



Амиров Р. Х.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт  
высоких температур Российской академии наук  
125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2  
Тел.: +74954842300  
Факс: +7495 4857990